

та происходит по круговой орбите, т. е. если для двойной звезды характерна не только устойчивость, но и постоянство размера системы, то равна нулю сумма кинетической энергии и половины потенциальной энергии.

Двойные галактики

Если две звезды занимают на небе очень близкое друг к другу положение, то все-таки нельзя только на основании этого утверждать, что они образуют двойную систему. Может быть так, что две звезды находятся друг от друга очень далеко, между собой не связаны, но случайно направления на них оказались почти совпадающими, как могут для прохожего почти совпадать направления на уличный фонарь и на Луну. Такую пару звезд принято называть оптической парой. Только после того как в результате обычно многолетних наблюдений выяснится, что одна из звезд движется по орбите около другой, можно утверждать, что это не оптическая пара, что две звезды образуют физическую систему.

Как и звезды, галактики довольно часто встречаются в виде пар. Пример тесной пары галактик NGC 4567 и NGC 4568 приведен на рис. 114. Но для галактик гораздо труднее выяснить, является ли наблюдаемая пара физически двойной галактикой или это только оптическая пара. У двойной галактики движение одного компонента по орбите вокруг другого настолько медленно, что его невозможно заметить даже после многолетних наблюдений. Покажем это простым расчетом. Пусть физически двойная галактика находится от нас на сравнительно небольшом внегалактическом расстоянии 10 Мпс и наблюдаемое угловое расстояние между центрами компонентов составляет $20'$. На расстоянии 10 Мпс угол $20'$ соответствует приблизительно 50 кпс, следовательно, если массы галактик одинаковы, то расстояние каждого компонента до центра инерции двойной системы равно 25 кпс. Будем считать теперь для простоты, что орбита компонента круговая, а масса его равна массе нашей. Галактики и составляет приблизительно 10^{11} г. Тогда по формуле (40) мы сосчитаем, что скорость орбитального движения равна приблизительно 100 км/с. Это, конечно, немалая скорость. Но на расстоянии 10 Мпс скорость в 100 км/с даст за год смещение, приблизительно равное $0'',000002$. Значит, нужно ждать 5000 лет, чтобы смещение составило

0",01 и могло быть обнаружено современными методами. Для того чтобы выяснить, является ли двойная система физической, недостаточно просто обнаружить смещение компонента, нужно еще убедиться в том, что движение является орбитальным, т. е. происходит по дуге. Это потребовало бы по крайней мере еще в 100 000 раз большего времени наблюдений за двойной галактикой, т. е. $5 \cdot 10^8$ лет.



Рис. 114. Двойная галактика в созвездии Девы NGC 4567 и NGC 4568.

Итак, обнаружить орбитальное движение у двойной галактики за приемлемый срок невозможно. Значит ли это, что мы не можем вообще утверждать, что двойные галактики существуют, что среди наблюдаемых пар галактик во всяком случае не все являются оптическими парами? Для решения таких задач применяется статистический метод. Используем его сначала для доказательства существования физических двойных звезд. Можно считать, что звезд 8-й звездной величины на небе всего 15 000, а звезд более ярких 8000. Предположим, что все эти звезды распределены по небу приблизительно равномерно, но не как солдаты в строю, а в среднем равномер-

но с естественными случайными отклонениями. Определим, сколько при этом можно ожидать образований таких оптических пар, у которых один компонент ярче 8^m , второй имеет 8-ю звездную величину, а угловое расстояние между компонентами не превосходит $1'$. Для этого мысленно окружим каждую из звезд ярче 8^m кружочками с радиусом $1'$. Суммарная площадь всех этих кружочков составит $8000 \cdot \pi \cdot (1')^2 \approx 25\,000$ кв. минут. А поверхность всего неба содержит $1486 \cdot 10^8$ кв. минут. Значит, площадь кружочков в 5920 раз меньше площади всего неба и в них можно ожидать попадания

$$\frac{15\,000}{5920} = 2,53,$$

т. е. двух или трех звезд 8-й звездной величины. Это и будет ожидаемое число оптических пар. На самом деле число двойных звезд, у которых главный компонент ярче 8^m , слабый компонент имеет 8-ю звездную величину, а расстояние между ними меньше $1'$, составляет около трехсот. Как мы подсчитали, следует ожидать, что из этого числа две или три являются оптическими парами. Значит, остальные пары не могут быть результатом случайностей проектирования и являются физическими двойными. Соотношение — 2—3 оптические пары и 300 физических двойных — показывает, что если обнаружена пара звезд с главным компонентом ярче 8^m и слабым компонентом 8-й звездной величины при угловом расстоянии между компонентами меньшим $1'$, то вероятность того, что это оптическая пара, равна $\frac{2,53}{300} \approx 0,008$, а вероятность того, что это физическая двойная, равна $1 - 0,008 = 0,992$. Следовательно, имеются значительные основания полагать, что обнаруженная двойная является физической двойной. Но полной уверенности нет, пока не будут выполнены наблюдения, подтверждающие, что движение компонента происходит по эллиптической орбите.

Мы привели простой расчет, годный для данного типа пары. Можно обосновать более общие критерии для двойных звезд, при выполнении которых двойная с большой степенью вероятности является физической двойной.

В общем каталоге двойных звезд Айткена принят, например, такой критерий отбора: в каталог включаются все двойные, у которых

$$\lg \rho \leq 2,8 - 0,2 m,$$

где ρ — расстояние между компонентами в секундах, m — видимая звездная величина главного компонента. Можно сосчитать, что если пара удовлетворяет этому условию, то вероятность, что она оптическая, очень мала.

Описанный статистический метод отбора двойных звезд еще более важен для отбора двойных галактик, потому что для большей части двойных галактик нет возможности каким-нибудь способом точно установить, что это физическая двойная. Приходится опираться на некоторый критерий, выполнение которого делает физичность двойной галактики весьма вероятной. Каталог двойных галактик был составлен шведским астрономом Хольмбергом. Хольмберг выделил все пары галактик, у которых взаимное расстояние компонентов не более чем в два раза превосходит сумму их диаметров.

При таком отборе в каталоге оказалось 695 двойных галактик. Можно быть уверенными, что подавляющее большинство из них физически двойные галактики. Но о каждой паре отдельно можно сказать: весьма вероятно, что это физически двойная галактика. Впрочем, в некоторых случаях наша уверенность в том, что пара физическая, становится почти полной. Это те случаи, когда можно обнаружить взаимодействие компонентов двойных галактик. Об этих взаимодействиях говорилось в гл. III. Если между компонентами пары протянулись мосты или если компонент выбросил в сторону другого хвост, если взаимодействие компонентов вызывает у них разрушение фасада (по образной терминологии Б. А. Воронцова-Вельяминова) или если пара погружена в общий туман, то мы становимся почти уверенными в физичности пары.

Читатель спросит, почему мы все еще сохраняем слово «почти». Ответ на этот вопрос сложен, так как мы не дали точного определения, что следует понимать под выражением «физически двойная галактика». И не сделали этого потому, что в современной научной литературе нет общепринятой формулировки. Пару галактик можно назвать физически двойной в трех случаях: 1) если компоненты имеют общее происхождение; 2) если компоненты динамически связаны, т. е. сумма кинетической и потенциальной энергий компонентов отрицательна; 3) если компоненты расположены в пространстве близко друг к другу.

Можно убедиться, что ни одно из определений не влечет за собой других. В самом деле, две галактики могут

иметь общее происхождение. Но если в момент формирования их или в какой-нибудь следующий момент в результате действия каких-то сил, например, сил взрывного характера, галактики приобретут большую скорость одна относительно другой, так что кинетическая энергия компонентов будет больше абсолютной величины потенциальной энергии, то компоненты начиная с этого момента перестанут быть динамически связанными, начнут расходиться, и наступит время, когда они станут весьма далеки друг от друга. С другой стороны, компоненты пары могут быть динамически связанными между собой, могут описывать около общего центра инерции эллиптические орбиты, но это может быть результатом взаимного захвата двух галактик, ранее ничего общего между собой не имевших. Захват — редкий процесс, требующий особого сочетания взаимных положений и скоростей в присутствии третьего тела, в данном случае третьей галактики, которая способствует захвату, но не подвергается захвату сама. И все же захват возможен и потому динамически связанные галактики не обязательно имеют общее происхождение. Наконец, из того, что в данный момент две галактики близки друг к другу, вовсе не следует обязательно, что они имеют общее происхождение или динамически связаны. Пространственная близость может быть результатом случайного сближения ранее ничего не имевших общего галактик, которые ни в какой момент не будут динамически связаны и в дальнейшем разойдутся.

Вот поэтому, если мы примем первое или второе определение физически двойной галактики, то обнаружение взаимодействия двух галактик, определенно указывающее на их пространственную близость друг к другу, только почти убеждает, что наблюдаемая пара является физически двойной.

Автор считает, что физически двойной галактикой нужно называть пару галактик в двух случаях: 1) если две галактики имеют общее происхождение и расстояние между ними существенно меньше среднего расстояния между соседними галактиками в той же области Вселенной или 2) если две галактики динамически связаны.

Компоненты физически двойной галактики находятся практически на одинаковом от нас расстоянии. Поэтому лучевые скорости, вызванные расширением пространства, у них одинаковы. Но так как компоненты совершают ор-

битальные движения около общего центра инерции, лучевые скорости у них все-таки должны быть различны, потому что различны в общем случае проекции орбитальных скоростей компонентов на луч зрения.

Итак, различная лучевая скорость компонентов двойной галактики отражает скорость орбитального движения компонентов. Но скорость орбитального движения связана с массой галактик. Не представляется ли счастливая возможность и в этих двойных системах определить массы компонентов? Только теперь компоненты уже не звезды, а галактики.

Основная трудность состоит в том, что разность лучевых скоростей компонентов равна разности не самих орбитальных скоростей, а их проекций на луч зрения. Проекция лишь в особом случае равна самой величине, но обычно она меньше, при этом она может быть меньше во много раз и даже равняться нулю. Если плоскость орбит компонентов двойной галактики перпендикулярна к лучу зрения, то проекция орбитальных скоростей на луч зрения будет все время равна нулю.

Наиболее интересен случай, когда луч зрения лежит в плоскости орбиты. Предположим, что компоненты двойной галактики принадлежат к одному и тому же типу галактик и потому можно считать их массы одинаковыми. Кроме того, для простоты предположим, что орбиты, по которым движутся компоненты, круговые. Тогда величины орбитальных скоростей и их проекций на луч зрения определяются из рис. 116. Буквой O обозначен центр инерции двойной галактики, буквой S — положение наблюдателя. В момент, когда первый компонент находится в точке 1 , второй компонент находится в точке 5 , их орбитальные скорости направлены у первого компонента к нам, у второго компонента от нас. Следовательно, половина разности лучевых скоростей компонентов равна орбитальной скорости компонента. В тот же момент, как легко понять из рис. 115, радиус орбиты равен

$$R = r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (41)$$

где α — наблюдаемое угловое расстояние между компонентами, а r — расстояние до двойной галактики. Расстояние можно получить по лучевой скорости двойной галактики, считая ее равной полусумме лучевых скоростей компонентов и используя закон Хабла. Теперь, так

как при движении по круговой орбите справедлива формула (39), мы, решив ее для \mathfrak{M}_2 и употребляя обозначение \mathfrak{M} , поскольку массы компонентов считаем одинаковыми, получаем

$$\mathfrak{M} = \frac{v^2 \cdot R}{G}. \quad (42)$$

Это позволит вычислить массу галактики.

Полученный таким путем результат будет верен лишь в том случае, если компоненты двойной находятся точно

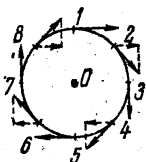


Рис. 115. Лучевая скорость компонентов двойной системы в зависимости от положения на орбите.

в положениях 1 и 5. Если же они находятся, например, в точках 2 и 6, то орбитальная скорость будет в $\sqrt{2}$ больше полуразности лучевых скоростей и радиус орбиты будет в $\sqrt{2}$ раза больше того, которое определяется из формулы (41), так как расстояние между компонентами тоже будет наблюдаться в проекции. Поэтому вычисленная по формуле (42) масса галактики окажется преуменьшенной в $(\sqrt{2})^3 \approx 3$ раза. Чем ближе один из компонентов к точке 3, а другой соответственно к точке 7, тем в большей степени будет преуменьшаться масса галактик.

Если орбиты в двойной галактике не проходят через луч зрения, а наклонены к нему под разными углами, то соотношения будут иными, но всегда, вычисляя массу по формуле (42), мы будем в различной степени в зависимости от положения компонентов на орбите преуменьшать их массу. Если бы наклон орбиты и положение компонентов на ней были известны, то поправочный множитель нетрудно было бы вычислить. Однако, по крайней мере в настоящее время, нет никакой возможности определить наклон орбиты и положение компонентов на орбите в двойной галактике. Поэтому поправочный коэффициент определить нельзя. Но нельзя им и пренебрегать, так как

он может быть очень велик. Значит ли это, что положение безвыходно?

Да, для какой-либо определенной двойной галактики положение пока безвыходное — определить ее массу по орбитальному движению компонентов невозможно. Но возможен другой подход, к которому в звездной астрономии прибегают, когда нельзя решить задачу для каждого индивидуального объекта. Это метод статистический.

Представьте себе, что вы имеете большое число двойных галактик с измеренными лучевыми скоростями обоих компонентов. Для каждой двойной мы не знаем наклона орбиты и положения на ней компонентов. Но естественно полагать, что наклоны орбит у разных двойных различны и различны положения компонентов на орбите. Более того, можно приблизительно считать, что компоненты равномерно распределены по орбитам, а сами орбиты равномерно распределены по всем возможным ориентациям в пространстве. Тогда можно теоретически вычислить средний поправочный коэффициент к формуле (42). Он оказался равным 3,39. Значит, при применении статистического метода нужно использовать формулу

$$\bar{M} = 3,39 \cdot \frac{\bar{v}^2 \bar{R}}{G}. \quad (43)$$

В этой формуле \bar{v}^2 — средняя величина квадрата разности скоростей между компонентами у рассмотренных двойных галактик, \bar{R} — среднее наблюдаемое расстояние между компонентами, а искомой величиной \bar{M} является средняя масса компонентов в рассмотренных парах галактик.

Статистический метод применил американский астроном Пейдж. Ему удалось получить лучевые скорости компонентов 65 двойных галактик. Средняя масса галактики получилась равной $2,5 \cdot 10^{11}$ масс Солнца. Для выделенных из общего числа 45 E- и S0-галактик средняя масса оказалась равной $4 \cdot 10^{11}$ масс Солнца, а для 20 S- и I-галактик $0,3 \cdot 10^{11}$ масс Солнца.

Теперь мы можем сравнить массы, вычисленные в двойных галактиках, с массами галактик в табл. 15, определенными по их вращению. Сравнение масс спиральных и неправильных галактик показывает достаточно хорошее согласие. Это убеждает, что примененные методы обоснованы. В частности, правильно предположение, что

рассмотренные Пейджем пары, составленные спиральными и неправильными галактиками, являются физически двойными галактиками.

С другой стороны, привлекает внимание вывод, что эллиптические и S0-галактики в среднем более чем в 10 раз массивнее спиральных и неправильных. Если это верно, то эллиптические галактики не могут быть эволюционно связаны со спиральными и неправильными, так как в ходе эволюции масса галактики не может увеличиться или уменьшиться в 10 раз. Она остается в ходе эволюции практически неизменной.

Тройные звезды и тройные галактики

Если движутся одна относительно другой две звезды и известны в какой-то момент времени их положения и скорости, то теория позволяет предсказать положение и скорость каждой из звезд в любой момент времени и как угодно точно. Задача двух тел имеет общее решение. Известно, что в двойных системах орбитами компонентов могут быть только эллипсы, параболы и гиперболы.

Но как только от двух тел мы переходим к трем телам, задача в огромной степени усложняется. Существует, правда, общее решение задачи, полученное в 1912 г. финским математиком Зундманом, дающее зависимость положений трех точечных тел от времени в виде бесконечных рядов. Но это один из тех редких случаев, когда ценный теоретический результат оказывается неприменимым на практике, так как использование его требует чрезмерно больших усилий. Как показал французский математик Белорицкий, для получения положений в задаче трех тел с той точностью, с какой в настоящее время обычно определяют положения планет, в рядах Зундмана необходимо брать сумму не менее $10^{8000000}$ членов — число, находящееся не только за пределами практики, но и недоступное нашему воображению. Для сравнения укажем, что полное число атомов во всей той области Вселенной, которая достижима современной астрономии (до расстояния 3000 Мпс), оценивается в $10^{75} - 10^{76}$.

Другой, на первый взгляд малопривлекательный путь исследования, называемый численным методом, состоит в том, что выбирают какие-то начальные положения и скорости трех тел и затем, шаг за шагом, вычисляют положения и скорости этих тел через равные малые проме-